参　考　文　献

原　広司，芦川　智，藤井　明：活動等高線（AC）についての基礎研究，生産研究，1972.

藤井　明：活動等高線（AC）に関する研究，日本建築学会論文報告集，1978.

芦川　智：活動等高線についての基礎研究，日本建築学会論文報告集，1979.

Haggett, P. : *Locational Analysis in Human Geography,* Edward Arnold, London, 1965.

乱流の秩序構造

農工大・教養　高　木　隆　司

§1. はじめに

乱流の秩序構造という概念はそれほど古いものではなく，だいたい過去10年間の間に注目を浴び，盛んに研究され出した。一般的には，筆者による解説[1)]を参照していただくとして，ここでは形の出現という面から説明することにしたい。だいたい「乱流」と「秩序構造」とは相反する概念である。乱流とは，煙突から出る煙や急流を下る川の水から想像されるように非常に乱雑な流れであるから，分子混屯と同様にあらゆる構造を壊すように働くはずである。ところが，ある種の乱流では，その中にある決ったタイプの構造が現れ，それがかなりの時間生き続けるのである。乱れがあるにもかかわらず秩序が出現するためには，熱力学の類推からもわかるように，外からの何らかの方法によるエネルギー注入が必要である。秩序構造は，エネルギーを絶えず受取ることによって，乱雑な乱れの中で一定の形態を保つものと解釈することができる。そのエネルギー源は乱流の平均流部分なのであるが，具体的な例を以下に説明して，大ざっぱに概念をつかむようにしたい。

その前に，流体力学にまだ慣れていない読者のために，簡単に乱流の説明をしておく。例えば円筒から噴出した噴流（jet）を考えよう。円筒からの噴流だから，円筒座標系（r，θ，X）を採用しよう（図１）。その中に測定端子をさし込めば，任意の場所で任意時刻tのX方向流速uを測ることができる。uは$r\,\theta\,X\,t$の関数である。ところが，測定値uを時間平均すると，装置の対称性から，平均値はt以外にθにも依らなくなることが直感的に理解できるであろう。これを平均流と呼び，$\overline{u}(r, X)$と表わす。各瞬間の流速uの$\overline{u}$からのずれをu'と

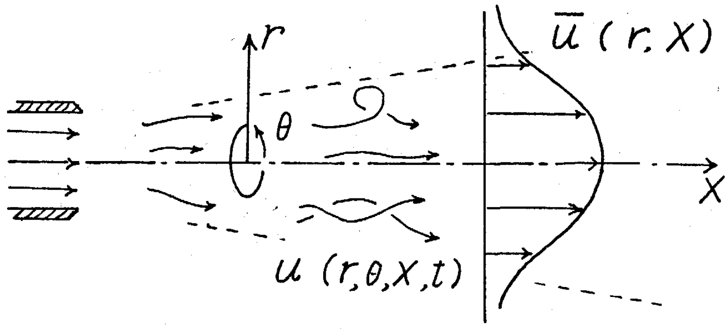

図１　乱流の平均流と変動部分。円形噴流の例。

と書き表わすと，

$$u = \overline{u}(r, X) + u'(r, \theta, X, t) \tag{1}$$

となる。u' は変動部分，あるいは乱流部分と呼ぶ。乱れがない層流の噴流では，u' は常に０であり，$u = \overline{u}$ である。u' を流体力学の基礎方程式から求めることはほとんど不可能であるし，u' の測定値そのものもそれほど意味はない。u' の自乗平均とか，r 方向の流速の変動部分 v' との相関とかの平均量が重要なのである。ところで，秩序構造という概念は，(1) のように u を分解することに対して疑問を投げかけた。それは，変動部分 u' の中にも秩序と形態を持つ成分が含まれているらしいからである。

結晶のように，熱運動がありながら形の現れるものがあるが，それは構成要素である分子が形を生む要因を持っているからである。それに比べて流体にはそれがない。ここで流体が持つ特異性についてまとめておこう。

(1) 流体は等方的な物性を持つ。物性定数は，密度 ρ や粘性率 η のようにスカラー量のみである。

(2) 媒質そのものには order state はない。あるいは，問題にしない。すなわち，通常の流れで問題になるスケールは１ミクロン以上であり，分子間距離よりはるかに大きい。

(3) 流れの中に形（流れ模様）が現れる要因は，慣性，粘性，境界条件の３つである。境界条件とは，十分遠方での流速とか，流れの中に物体が置かれている場合は，物体表面での流速等を意味する。ちなみに，慣性と粘性の効果の比をレイノルズ数と呼ぶ。

$$\text{レイノルズ数}\ Re = \frac{(\text{慣性})}{(\text{粘性})}$$

§ 2. 秩序構造の例

図2から図5までに4つの例を示した。図2はカルマン渦列と呼ばれるもので，円柱のすぐ

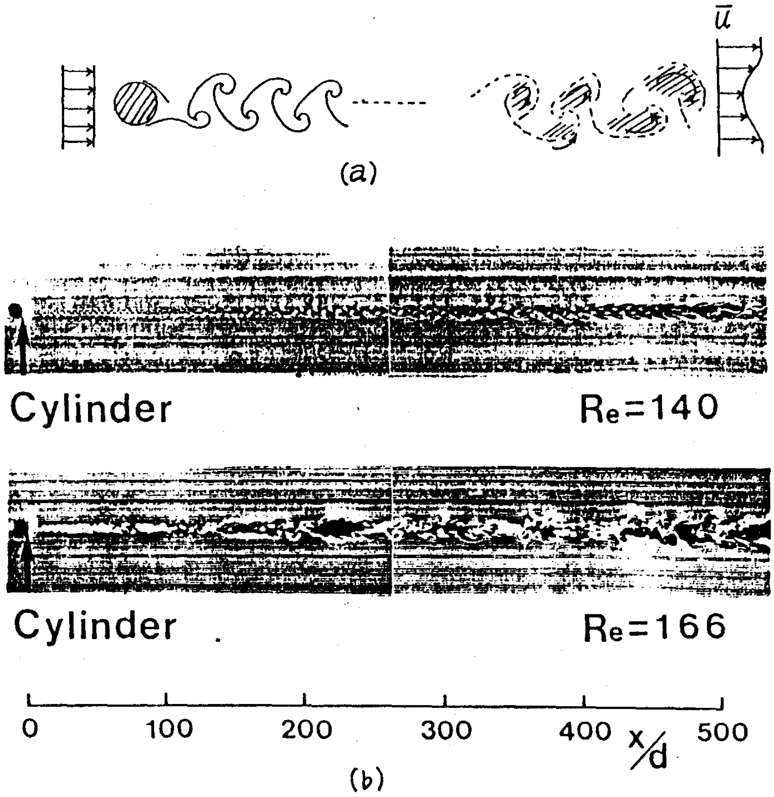

図2　カルマン渦列。(a)は概念図。(b)は奥出氏による可視化写真[2]。d は円柱直径，x は流れ方向の座標。

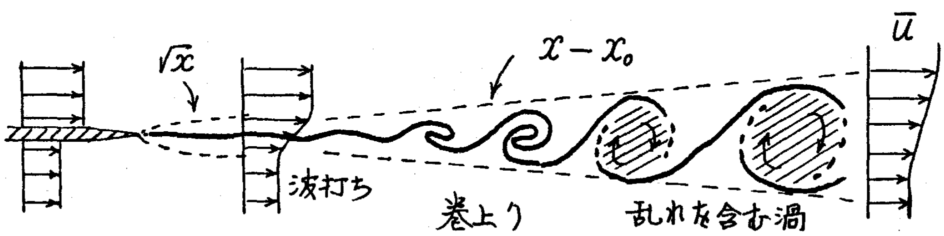

図3　二次元混合層。仕切り板の後端から染料を流し，下流での流れ模様を見る。渦の中の斜線は乱れた領域であるが，その中でも矢印で示したような秩序運動がある。

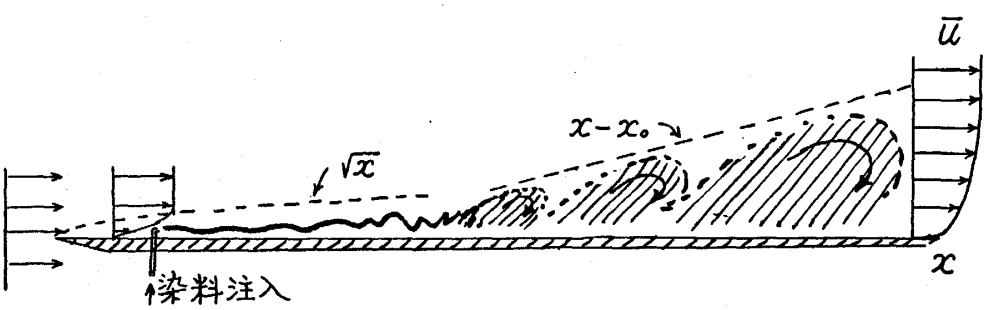

図4　境界層流。$\sqrt{x}$ で成長する層流領域から，$x-x_0$ で成長する乱流領域へ遷移する。斜線領域中の矢印は秩序運動。

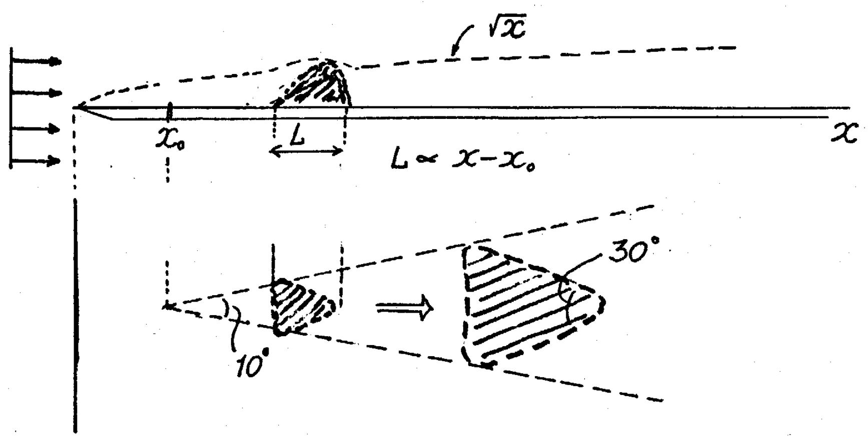

図5　乱流斑点。x_0 で電気火花，微小噴流などの方法で流れに刺激を与えると，三角形の乱流領域ができ，下流に流されるに従って相似的に成長する。

後方では層流であり規則的に渦が並ぶが，十分後方では乱れが生じる。乱れていても，交互に逆向きの場が並ぶという性質は保っているらしい。ただ，その配置が不規則というだけであり，１個の渦を取り上げれば，その中にはかなりの秩序がありそうに見える。秩序が形成される要因は，図２(a)の右端に示した平均流である。その上半分は流体を時計まわりにころがすような剪断（ずり流れ）がかかっており，下半分ではその逆である。この剪断が乱れに対抗して，平均流の幅と同じスケールの渦を作るのである。

図３は混合層と呼ばれる流れで，２つの異なる速さを持つ領域の境界に発達する。粘性によって $\sqrt{x}$ に比例して幅が増大する外に，境界の巻き上りが起き，やがて乱れが発達する。乱れが出来ても大スケールの渦という形は保たれる。この後，混合層の幅や，その中に現れる渦のスケールは x に比例して増大する。渦構造が消えない理由は，言うまでもなく混合層の平均流が持つ剪断である。

図４は，境界層と呼ぶ流れで，一様な流れが，突然流れに平行な平板に出合ったとき，平板の表面近くに粘性によって減速した領域ができる。その厚さは $\sqrt{x}$ で発達するが，やがて乱れが生じて $x-x_0$ に比例して厚くなり始める。（x_0 は実効的原点）しかし，乱れた境界層内にも，決ったタイプの構造が絶えず生み出されている。図５に示したように，構造は乱れの塊という形を持ち，平均流によって下流に流れていき，そのスケールは $x-x_0$ に比例して増大していく。

図５は乱流斑点と呼ばれるもので，層流の境界層で平板上のある一点（$x=x_0$）に刺激を与えると，そこから特有の構造を持つ乱流領域が発生し，下流に流されていく。その間，構造は相似性を保ちながら $x-x_0$ に比例してスケールが大きくなる。この領域は上から見ると二等

辺三角形であり，頂角は約30°，スケールの増大の角度は約10°である。図4，5の2つの例でも，構造を維持するものはやはり平均流である。

§3. 理論的研究は？

実験データが多数あるのに比べて理論的研究は少ない。一番の問題点は，平均流からいかにしてエネルギーをもらって構造ができるかという点であろう。概念的にこれに近い問題は，層流の安定性である。流れ方向（x 方向）に一様な平行流があり，その中に $\exp(ikx)\phi(y)$ という形を持つ微小攪乱が発達するかどうかということを問う問題である。この攪乱がやがては乱流を引き起こすのであるが，安定性の理論の範囲内では乱流というものはどこにも存在しないのである。発達した攪乱も exp で現されるような規則的な波である（図3，4の中で乱れが生じる前の波状の部分に対応する）。乱れ，あるいは不規則性を何らかの形で取り入れて，ある特定の構造が発達するかどうかということを理論的に解析できれば面白いのであろうが，まだ成功した例を知らない。

数値計算によって実験事実に類以の構造を導き出す試みはいくつかあり，どれももっともらしい結果を出している[3~6]。

乱流の変動部分 u' が秩序構造を含んでいるということから，u' をさらに2つに分割して構造の動力学を解析する試みがある。秩序構造部分を $\widetilde{u}$ と書き，残りの本当に乱雑な部分を u' と書くことにすると，(1)式の代りに，

$$u(\boldsymbol{r},t)=\overline{u}(\boldsymbol{r})+\widetilde{u}(\boldsymbol{r},t)+u'(\boldsymbol{r},t) \tag{2}$$

となる。それぞれの成分が持つ空間的スケールは，平均流 $\overline{u}$ が流れ全体の大きさ，u' が微視的な（と言っても分子間距離よりははるかに大きい）大きさ，$\widetilde{u}$ がそれらの中間の大きさである。

§4. おわりに

以上，乱れの影響を受けているはずなのに決った構造が維持されるいくつかの例を見てきた。本研究会で，他の分野の現象について話を聞く機会を得たが，筆者が興味を持ったのは雪の結晶の成長に関する形態安定性という概念である。形態を生む要因が，結晶では結晶軸の存在であり，流体では平均流の持つ非等方性であるから異ってはいるが，どちらも非平衡状態の開放系という共通した性質を持っている。解析の手法を開発する上でヒントが得られるかも知れない。秩序構造を実験的にどのように検出するか，そのデータがどれほど物理的意味を持つかと

いう問題もあるが，それはここでは省略した。

文　　献

1）高木隆司：日本物理学会誌 **37** (1982) 20.

2）奥出宗重：Nagare **9**, No.4 (1977) 1.

3）J.P. Christiansen & N.J. Zabusky : J. Fluid Mech. **61** (1973) 219.

4）D. W. Moore & P.G. Saffman : J. Fluid Mech. **69** (1975) 465.

5）W. T. Ashurst : *Turbulent Shear Flows* I. Springer-Verlag 1977, p. 402.

6）高木隆司：日本流体力学会誌に投稿中。

2次元パターンのフラクタル的性質

東北大・通研　山　崎　光　昭，　太　田　正之輔

1. Computer Simulation

Computer simulation によって得られたパターンを図1に示す。これらのパターンは，次の様な rule によって描かれたものである。

(1) 基盤の目を考える。

(2) すでにぬりつぶされた目を＋1，その周囲を－1，それ以外の空白の部分を○とおく。

(3) －1の全ての目の中から，乱数によって1つを選び出し，それを＋1に変更する。同時にそのまわりの0を－1に変更する。

(4) パラメータとしては，先端優先率 R を用いる。すなわち，各先端は，各側面より R 倍伸びやすいとする。

図1は，新たに伸びた目の中心を各ステップ毎に直線で結んだものである。

2. Fractal Dimension

このようにして得られたパターンの Fractal Dimension を測定してみる。海岸線の長さを測る要領で，パターンを長さ η の物差しで覆ったとき，全周を覆いつくすためには $N(\eta)$ 個の物差しが必要であるとする。もし $\log N(\eta)$ と $\log\eta$ の関係が直線であらわされるならば，こ